

目次(卷终)

基于气象条件指数的我国重点区域PM_{2.5}和臭氧复合污染气象影响评估..... 杨欣, 杨元琴, 李红, 高健, 牛军捷, 储王辉, 刘世杰, 陈义珍, 何友江, 赵好希 (6433)

“2+26”城市PM_{2.5}与气象因子的尺度依存关系及影响因素分析..... 吴舒祺, 金团团, 郑冬阳, 顾杨吻, 赵文吉 (6441)

武汉军运会前后大气PM_{2.5}化学组分和来源..... 刘世豪, 孔少飞, 郑煌, 陈楠, 祝波, 祁士华 (6452)

2016~2020年邯郸市冬季PM_{2.5}污染特征与来源解析..... 牛红亚, 高娜娜, 鲍晓磊, 胡伟, 胡偲豪, 吴春苗, 马心怡, 纪晓腾, 樊景森, 王金喜 (6463)

渭南市冬季PM_{2.5}化学组成及来源解析..... 郭景宁, 李小飞, 余锋, 张蕊, 高月, 杨雯 (6474)

长三角城郊冬季PM_{2.5}中铵盐的形成过程及来源解析..... 项妍琨, 曹芳, 张雯淇, 范美益, 章炎麟 (6486)

上海城区硝基芳香族化合物的化学组成及特征分析..... 杨露, 马英歌, 郁建珍, 吴宇航, 乔利平, 周敏, 朱书慧, 黄成, 童张法 (6495)

吕梁市PM_{2.5}中多环芳烃的来源解析及健康风险评估..... 车玲, 刘紫叶, 李杨勇, 李雪梅, 李晓帆, 刘添, 冯传阳, 姜辛 (6508)

广西背景大气中生物质燃烧对碳质气溶胶组成和吸光性的影响..... 吴星麒, 曹芳, 洪一航, 邢佳莉 (6518)

南京北郊大气棕碳吸光特性、来源及其季节变化特征..... 陈星州, 崔世杰, 张运江, 先久坤, 王镜雯, 汪俊峰, 盖鑫磊 (6529)

京津冀地区“煤改电”对PM_{2.5}污染的健康效益评估..... 张茹婷, 陈传敏, 刘松涛, 吴华成, 周卫青, 李朋 (6541)

基于化学损耗修正的青岛胶州市环境VOCs来源解析..... 孔翠丽, 吴雨彤, 顾瑶, 宋江邦, 孟赫, 石来元, 刘保双 (6551)

聊城市城区夏季VOCs污染特征及来源解析..... 李万勇, 黄浩瑜, 王艳振, 朱子博, 王一秋, 高艳珊, 彭娜娜, 伦小秀, 黄亮, 冯如帆, 菅月诚, 王强 (6564)

基于三维空气质量模型的淄博市臭氧及前体物来源解析..... 张馨心, 赵秀颖, 黄凌, 薛金, 卞锦婷, 王杨君, 李莉 (6576)

中国高温下臭氧抑制事件的时空特征及其影响因素..... 欧林冲, 陈伟华, 伍永康, 吴乐敏, 王雪梅 (6586)

基于无人机的城市大气细颗粒物与臭氧污染探测与溯源研究进展..... 曲雅微, 王体健, 袁成, 吴昊 (6598)

京津冀地区机动车细颗粒物污染的健康影响分析..... 郝永佩, 宋晓伟, 朱晓东, 王京伟, 程鹏 (6610)

中国水泥行业通过CCUS技术的减排潜力评估..... 魏宁, 刘胜男, 魏凤, 李小春 (6621)

钢铁行业生命周期碳排放核算及减排潜力评估..... 宋晓聪, 杜帅, 邓陈宁, 谢明辉, 沈鹏, 赵慈, 陈忱, 刘晓宇 (6630)

珠江三角洲二氧化碳源汇演变特征及驱动因素..... 胡景心, 沙青娥, 刘慧琳, 张雪驰, 郑君瑜 (6643)

东莞市低碳路径下加速电气化对CO₂和污染物协同减排影响..... 吴乐敏, 陈丙寅, 欧林冲, 白玉洁, 刘可旋, 王伟文, 彭勃, 王雪梅 (6653)

县域尺度下长株潭地区城市化与碳排放的关系..... 刘贤赵, 李阳 (6664)

城市草坪温室气体排放特征及影响因素..... 陈丽涵, 刘硕, 林溢, 郭娜, 臧昆鹏, 陈圆圆, 李嘉鑫, 邱珊珊, 卿雪梅, 洪海祥, 蒋凯, 熊浩宇, 方双喜 (6680)

双视角下中国畜牧业甲烷排放的温室效应..... 刘舒乐, 严薇, 高庆先, 马占云 (6692)

中国典型流域有机磷酸酯的污染特征与风险评估..... 赵江陆, 路海健, 吕佳佩, 杨江涛, 罗莹, 曹渺, 孙善伟, 郭昌胜, 徐建 (6700)

黄河下游悬河段饮用水源地土壤重金属污染、来源及健康风险..... 彭超月, 任翀, 申浩欣, 王艳锋, 段海静, 王玉龙, 李旭辉, 刘德新, 马建华 (6710)

黄河干流沉积物重金属的赋存形态特征及污染评价..... 王依滴, 欧阳威, 刘连华, 陆中桂 (6720)

土地利用结构与空间格局对鄱阳湖流域中小河流水质的影响..... 温嘉伟, 王鹏, 黄高翔, 张华, 聂明华, 丁明军, 折远洋 (6728)

内蒙古典型湖泊水环境特征及水质评价..... 王欣远, 潘保柱, 王立新, 刘铁军, 廖梓龙, 韩语, 杨子杰 (6744)

锡林河上游雨季降水、河水和地下水转化关系..... 孙金, 王怡璇, 杨璐, 段利民, 褚少杰, 张桂馨, 张波, 刘廷杰 (6754)

西北盐湖流域地下水水化学特征及控制因素..... 艳艳, 高瑞忠, 刘廷玺, 房丽晶, 王银龙 (6767)

巴里坤-伊吾盆地平原区地下水污染风险评价..... 刘钰, 曾妍妍, 周金龙, 闫志云, 白凡 (6778)

亚硫酸氢盐强化微量Fe²⁺活化过二硫酸盐降解扑热息痛..... 莫苗婷, 聂淑华, 晏彩霞, 丁明军, 陈诗瑶, 聂明华 (6790)

污泥生物炭活化过一硫酸盐降解环丙沙星..... 郑大洋, 邹佳丽, 徐皓, 王滕, 石宇翔, 陈永健, 李彬阳, 王亚宜, 冯沁, 吴敏 (6801)

NaHCO₃活化荞麦皮生物炭对碘酚的吸附..... 魏红, 赵江娟, 景立明, 钮金芬, 付冉, 董莹 (6811)

竹基N、P共掺杂活性炭的制备及其锂离子吸附性能..... 王贵龙, 刘艳艳, 江荣源, 李思敏, 林冠峰, 卢贝丽, 黄彪, 陈燕丹 (6823)

西南高山峡谷区植被变化及影响因素分析..... 赖金林, 齐实, 崔冉冉, 廖瑞思, 唐颖, 李鹏 (6833)

生物炭施用对农田土壤团聚体及有机碳影响的整合分析..... 孟艳, 沈亚文, 孟维伟, 王旭清, 李宗新, 刘开昌, 代红翠 (6847)

农田土壤碳循环过程及其量化方法..... 孙昭安, 朱彪 (6857)

生物炭施用5a后对桂北桉树人工林土壤有机碳组分的影响..... 牟芝熠, 沈育伊, 曹杨, 王紫卉, 陈运霖, 滕秋梅, 黄科朝, 毛馨月, 徐广平 (6869)

喀斯特地区植被恢复下土壤活性有机碳与碳库管理指数的演变特征..... 蔡华, 舒英格, 王昌敏, 廖远行, 罗秀龙, 龙慧, 李雪梅 (6880)

中国典型抗生素在环境介质中的污染特征与生态风险评估..... 陈丽红, 曹莹, 李强, 孟甜, 张森 (6894)

基于MGWR的土壤pH值空间建模及其影响因素分析..... 赵明松, 陈宣强, 徐少杰, 邱士其, 王世航 (6909)

某燃煤电厂周边农田土壤重金属污染特征及源解析..... 张军, 李旭, 刘磊玉, 李雨茹 (6921)

重庆典型在产石化场地土壤污染特征及来源解析..... 张渝蓉, 罗帅, 陈媛, 曹军, 刘斌, 刘元元 (6933)

高垦殖丘陵区不同类型农用地土壤中抗生素抗性基因分布特征..... 陈瑞, 程建华, 唐翔宇 (6947)

有机肥配施生物炭对果园土壤反硝化微生物和酶活性的影响..... 邓正昕, 高明, 熊子怡, 王莹燕, 谢军, 王子芳 (6955)

有机肥处理对旱地土壤细菌群落及玉米生产力的影响..... 林婷婷, 郑洁, 朱国繁, 梁璐, 杨叶钰萍, 刘佳, 徐勤松, 孙波, 蒋瑞霖 (6965)

微塑料和镉复合污染对狼尾草根际土壤微生物群落结构和功能的影响..... 段莉阳, 张玉, 任学敏, 李玉英, 张英君, 张浩, 韩辉, 陈兆进 (6973)

设施番茄种植年限对土壤理化性质及微生物群落的影响..... 赵阳阳, 刘银双, 宋瑶, 张晓旭, 贾振华, 黄亚丽 (6982)

3种氧化剂对焦化场地多环芳烃的修复效果与土著微生物的响应关系..... 李伟, 王伟华, 孟祥宇, 孙英杰, 王亚楠, 李书鹏, 杨乐巍, 刘鹏, 刘渊文 (6992)

河北省不同盐渍化土壤类型的微生物多样性与种群结构..... 刘银双, 牛宏进, 赵阳阳, 孙宏勇, 陈晓波, 黄亚丽 (7004)

玉米根际微生物氮磷转化的功能基因组学分析..... 汪香君, 姜美彤, 李森, 倪浩为, 孙波, 梁玉婷 (7014)

外源菌剂联合柠檬酸强化龙葵修复土壤镉污染..... 王楷, 王丽, 王一钰, 游梦, 梁婷, 邹茸, 范洪黎 (7024)

1株肠杆菌与硫酸联合施用对水稻积累镉的影响..... 张朴心, 姚俊帆, 刘玉玲, 张威宇, 尹雪斐, 铁柏清 (7036)

《环境科学》第44卷(2023年)总目录..... (7045)

《环境科学》征订启事(6507) 《环境科学》征稿简则(6620) 信息(6743, 6846, 6856)

渭南市冬季 PM_{2.5} 化学组成及来源解析

郭景宁¹, 李小飞^{1,2,*}, 余锋¹, 张蕊¹, 高月³, 杨雯¹

(1. 陕西科技大学环境科学与工程学院, 西安 710021; 2. 中国科学院地球环境研究所黄土与第四纪地质国家重点实验室, 西安 710061; 3. 长安大学水利与环境学院, 西安 710054)

摘要: 基于2020年12月16日至2021年1月14日采集的渭南PM_{2.5}样品,分析了PM_{2.5}中碳质组分和无机离子的污染特征,并利用正矩阵因子分解法(PMF)、潜在源贡献因子(PSCF)和浓度权重轨迹(CWT)等方法对其来源与源地进行了解析。结果表明,渭南冬季夜间和白天 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 、 $\rho(\text{OC})$ 、 $\rho(\text{EC})$ 、 $\rho(\text{TWSIIs})$ 的平均值分别为:119.08、17.02、6.20、34.20 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和130.66、18.09、6.22、50.65 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。采样期间水溶性离子浓度表现为: $\text{F}^- > \text{NO}_3^- > \text{Ca}^{2+} > \text{SO}_4^{2-} > \text{Na}^+ > \text{Cl}^- > \text{NH}_4^+ > \text{K}^+ > \text{Mg}^{2+}$ (白天); $\text{NO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Ca}^{2+} > \text{NH}_4^+ > \text{F}^- > \text{Na}^+ > \text{Cl}^- > \text{K}^+ > \text{Mg}^{2+}$ (夜间)。白天PM_{2.5}呈酸性,夜间呈碱性。采样期间SOR和NOR值分别为0.20和0.09,白天NH₄⁺与SO₄²⁻和NO₃⁻的相关系数R²分别为0.04和0.07,夜间为0.09和0.65。PMF模型解析表明,渭南冬季PM_{2.5}的来源主要为燃煤和工业排放源、扬尘源和二次源。后向轨迹结合潜在源分析指出,渭南冬季PM_{2.5}来源可以分为两类:一类为西北向远源传输,主要受甘肃、内蒙古南部以及宁夏等地影响;另一类为本地排放,受渭南邻近城市咸阳、西安和铜川等地影响。

关键词: PM_{2.5}; 化学组成; 污染特征; 潜在源地; 渭南

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)12-6474-12 DOI: 10.13227/j.hjxx.202212079

Chemical Compositions and Sources of PM_{2.5} in Weinan City

GUO Jing-ning¹, LI Xiao-fei^{1,2,*}, YU Feng¹, ZHANG Rui¹, GAO Yue³, YANG Wen¹

(1. School of Environmental Science and Engineering, Shaanxi University of Science and Technology, Xi'an 710021, China; 2. State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China; 3. School of Water and Environment, Chang'an University, Xi'an 710054, China)

Abstract: Based on the PM_{2.5} samples from Weinan City collected from December 16, 2020 to January 14, 2021, the contamination characteristics of the carbonaceous components and inorganic ions in PM_{2.5} and the relationship between PM_{2.5} and water-soluble ions were analyzed. Meanwhile, the sources and source areas were also analyzed by using the positive matrix factorization (PMF), potential source contribution factor (PSCF), and concentration weight trajectory (CWT) methods. The results showed that the night and daytime concentrations of PM_{2.5}, OC, EC, and TWSIIs during the winter in Weinan City were 119.08, 17.02, 6.20, and 34.30 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ and 130.66, 18.09, 6.22, and 50.65 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, respectively. Ion concentrations followed the order of $\text{F}^- > \text{NO}_3^- > \text{Ca}^{2+} > \text{SO}_4^{2-} > \text{Na}^+ > \text{Cl}^- > \text{NH}_4^+ > \text{K}^+ > \text{Mg}^{2+}$ during the daytime and $\text{NO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Ca}^{2+} > \text{NH}_4^+ > \text{F}^- > \text{Na}^+ > \text{Cl}^- > \text{K}^+ > \text{Mg}^{2+}$ at night. PM_{2.5} was acidic during the day and alkaline at night. SOR and NOR values were 0.20 and 0.09, respectively. The R² values of NH₄⁺ and SO₄²⁻ during the day and night were 0.04 and 0.09, respectively, and those of NH₄⁺ and NO₃⁻ during the day and night were 0.07 and 0.65, respectively. The PMF model analysis showed that the sources of PM_{2.5} in Weinan City during the winter were mainly coal burning and industrial emission sources, dust sources, and secondary sources. Backward trajectory combined with the potential source analysis indicated that the PM_{2.5} sources in Weinan City during the winter could be divided into two categories: the first was northwest to the remote source transmission, mainly affected by Gansu, Southern Inner Mongolia, and the Ningxia Hui Autonomous Region; the other category was local emissions, affected by the surrounding neighboring cities of Xianyang, Xi'an, and Tongchuan.

Key words: PM_{2.5}; chemical compositions; pollution characteristics; potential source and source area; Weinan City

PM_{2.5}的形成过程和来源都非常复杂^[1],进一步了解PM_{2.5}的化学组成,有助于准确评价其气候、环境污染以及对身体健康的危害^[2,3]。PM_{2.5}的主要成分包括碳质气溶胶和水溶性离子。其中碳质气溶胶包括有机碳(organic carbon, OC)和元素碳(elemental carbon, EC)^[4]。EC由污染物直接排放产生,可用来指示一次污染物的排放^[5]。OC组成更为复杂,包括一次有机碳(primary organic carbon, POC)和二次有机碳(secondary organic carbon, SOC)^[6]。水溶性离子占PM_{2.5}的30%~80%^[7],主要包括4种阴离子(Cl⁻、F⁻、SO₄²⁻和NO₃⁻)和5种阳离子(NH₄⁺、K⁺、Na⁺、Ca²⁺和Mg²⁺)。目前,国内

国外学者对大气颗粒物中的OC、EC和水溶性离子进行了大量的相关研究,成果丰硕^[8-12]。而国内对PM_{2.5}中化学组分的相关研究主要集中在京津冀及周边地区、长三角地区和珠江三角洲地区等经济发达城市^[13-15],对汾渭平原PM_{2.5}的相关研究还相对较少。

汾渭平原总占地面积7万km²,北起山西省阳曲县,南至陕西省秦岭山脉,西至陕西省宝鸡市,呈

收稿日期: 2022-12-09; 修订日期: 2023-02-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(42177366); 黄土与第四纪地质国家重点实验室开放基金项目(SKLLQG2133)

作者简介: 郭景宁(1999~),女,硕士研究生,主要研究方向为PM_{2.5}化学组成及来源解析, E-mail: 210311031@sust.edu.cn

* 通信作者, E-mail: lixiaofei@ieccas.cn

东北-西南方向分布,整体呈狭长月牙型,两端窄,中间宽,地形多以盆地为主,工农业生产水平较高.汾渭平原地势平坦,属于暖温带半湿润气候,气候纬向差异明显.包括山西省晋中、运城、临汾和吕梁市,河南省洛阳和三门峡市,陕西省西安、铜川、宝鸡、咸阳、渭南以及杨凌示范区(含陕西省西咸新区和韩城市),是我国打赢蓝天保卫战重点区域之一,近年来大气污染问题突出,成为了我国 PM_{2.5} 重污染区域之一^[16].牟臻等^[17]的研究发现,2017 年冬季西安 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 的平均值已经达到 $(145.43 \pm 96.28) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,属于中度污染水平.

潜在源贡献因子(potential source contribution factor, PSCF)和浓度权重轨迹(concentration weight trajectory, CWT)等方法被广泛应用于大气污染物区域传输规律的研究.尽管 PSCF 和 CWT 模型在国内外大气污染物传输规律研究中得到了广泛的应用^[14,18,19],但更侧重于 PM_{2.5} 这一种污染物潜在来源的解析,对碳质气溶胶 OC、EC 及水溶性离子等潜在来源的研究还相对较少.目前,应用 PSCF 和 CWT 模型对汾渭平原大气污染物的研究多集中在某个污染事件或某种单一污染物的研究^[20,21].此外, PSCF 和 CWT 模型还用于研究汾渭平原沙尘和人为混合空气污染来源^[22].以上研究表明,汾渭平原 PM_{2.5} 的污染来源主要受本地源和内蒙古西部远源传输的影响.由此可见,亟待开展汾渭平原 PM_{2.5} 的污染特征、化学组成、传输路径及潜在源地的研究.

基于此,本文以汾渭平原典型城市——渭南为例,于 2020 年 12 月 16 日至 2021 年 1 月 14 日采集了渭南 PM_{2.5} 样品,对渭南 PM_{2.5}、OC、EC 和水溶性离子浓度变化进行了分析,利用 PMF 模型对渭南冬季 PM_{2.5} 进行了源解析,利用 PSCF 和 CWT 模型结合后向轨迹聚类方法分析了渭南冬季 PM_{2.5}、OC、EC 和总水溶性离子(TWSIs)的输送路径及潜在贡献源区.通过对 OC、EC 和 TWSIs 来源解析,能更精确地了解 PM_{2.5} 中一次污染物和二次污染物的潜在源区及浓度贡献,以期为渭南及汾渭平原大气污染防治提供更加细致和精准的指导.

1 材料与方法

1.1 观测地点

渭南位于汾渭平原中部(图 1),属于暖温带大陆性季风型半湿润气候.观测地点位于陕西省渭南市生态环境局楼顶(109.50°E,34.50°N),距地面高约 20 m.采样点附近有公路,小区住宅、学校和商业混合区,附近无明显工业排放源.2020 年 12 月 16 日至 2021 年 1 月 14 日采集 PM_{2.5} 颗粒,09:00 ~

17:30 采集白天样品,18:00 至次日 08:30 采集夜间样品.在 2020 年 12 月 15 日和 2021 年 1 月 15 日分别采集两组空白样品,以消除实验操作误差,即在不启动仪器的情况下 09:00 ~ 17:30 采集白天空白样品,18:00 至次日 08:30 采集夜间空白样品.采样期间,选用直径为 90 mm 的石英滤膜,使用中流量采样器(HC-1010,中国青岛),流量为 $100 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 采集 PM_{2.5} 样品.

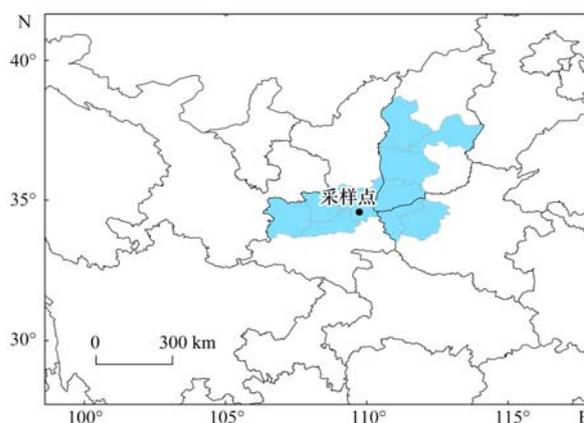


图 1 渭南采样点位置示意

Fig. 1 Sampling location in Weinan City

1.2 化学分析

所采集样本中的 OC 和 EC 含量采用 Sunset (Sunset Laboratory, 美国)热/光碳分析仪,基于 IMPROVE-A 协议进行分析^[23].热光反射法的基本原理^[24]:从采集的石英滤膜中取 0.5 cm^2 的样品加载于样品舟,通入纯氦气载气,在无氧条件下温度依次升温至 120、250、450 和 550°C,使样品中的有机碳 OC1、OC2、OC3 和 OC4 依次挥发.之后再通入 2% 的氧气和 98% 氦气的混合气体,继续加热至 550、700 和 800°C 使样品中的元素碳 EC1、EC2 和 EC3 依次挥发,释放出的有机物在 MnO₂ 的作用下,被催化氧化为 CO₂,再在还原炉中被还原成 CH₄,最后通过火焰离子化检测器(FID)定量检测.升温全程采用 633 nm 激光照射样品,测定有机碳碳化形成的裂解碳(OPC),最终 OC 和 EC 定义为:

$$\text{OC} = \text{OC1} + \text{OC2} + \text{OC3} + \text{OC4} - \text{OPC} \quad (1)$$

$$\text{EC} = \text{EC1} + \text{EC2} + \text{EC3} + \text{OPC} \quad (2)$$

采用 EC 示踪法^[25,26]来估算 POC 和 SOC 浓度,其计算公式为:

$$\text{SOC} = \text{OC}_{\text{tot}} - \text{EC} \times (\text{OC}/\text{EC})_{\text{min}} \quad (3)$$

$$\text{POC} = \text{EC} \times (\text{OC}/\text{EC})_{\text{min}} \quad (4)$$

式中,OC_{tot}为总有机碳浓度, $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$; $(\text{OC}/\text{EC})_{\text{min}}$ 为 OC/EC 最小值.

取 1/4 采样滤膜剪碎后置于 15 mL 玻璃样品瓶中,加入 10 mL 超纯水,拧紧瓶盖,置于超声波清洗

仪中超声萃取 30 min, 萃取液使用 0.22 μm 微孔注射过滤器过滤后使用离子色谱仪进行定量分析. 所采集样品中水溶性阴离子 (Cl^- 、 F^- 、 SO_4^{2-} 和 NO_3^-) 和阳离子 (NH_4^+ 、 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+}) 采用离子色谱仪测定 (ICS-2500, DX-600, 美国), 测定误差 $< 1\%$, 所有离子的检测限均为 $1 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$. 阴阳离子电荷平衡可用于评估 $\text{PM}_{2.5}$ 的酸碱度^[27], 计算如公式(5)和公式(6)所示.

$$\text{AE} = \frac{\text{F}^-}{19} + \frac{\text{Cl}^-}{35.5} + \frac{\text{NO}_3^-}{62} + \frac{\text{SO}_4^{2-}}{48} \quad (5)$$

$$\text{CE} = \frac{\text{K}^+}{39} + \frac{\text{Ca}^{2+}}{20} + \frac{\text{Na}^+}{23} + \frac{\text{Mg}^{2+}}{12} + \frac{\text{NH}_4^+}{18} \quad (6)$$

式中, AE 为阴离子当量, CE 为阳离子当量. AE/CE > 1 时, 则 $\text{PM}_{2.5}$ 呈酸性, 反之则呈碱性.

为了深入了解 SO_2 向 SO_4^{2-} 和 NO_2 向 NO_3^- 的转化过程, 通常计算硫氧化率 SOR 和氮氧化率 NOR 的比值来判断二次转化程度^[28]. 计算如公式(7)和(8)所示.

$$\text{SOR} = \frac{c(\text{SO}_4^{2-})/96}{c(\text{SO}_4^{2-})/96 + c(\text{SO}_2)/64} \quad (7)$$

$$\text{NOR} = \frac{c(\text{NO}_3^-)/62}{c(\text{NO}_3^-)/62 + c(\text{NO}_2)/46} \quad (8)$$

式中, c 为离子浓度. SOR/NOR 比值越大, 二次转化程度越高.

1.3 质量保证及控制

在采样之前, 石英滤膜在马弗炉中以 450°C 焙烧 4 h, 以去除残留的碳和其他杂质. 采样之后将滤膜样品放入干净的膜盒中并用密封袋装好, 于 -10°C 密封保存备用. 采样前后, 将滤膜置于干燥皿中平衡 48 h 后进行称重. 采样开始前一天和采样结束后一天采集两组空白样品, 以此消除操作误差. 在采样期间定期检查和校准相关配件和采样器. 进行超声波萃取时加入冰块, 保证温度不超过 20°C , 以减少待测组分的损失.

1.4 PMF 模型

PMF 模型是大气颗粒物来源解析常用的一种受体模型^[29]. 本研究中使用 PMF5.0 对渭南冬季白天和夜间 $\text{PM}_{2.5}$ 的主要来源分别进行解析. 本研究中所用到的不确定度为测定值的 5% ^[30]. 在分析过程中, 对采样分析所得数据的样品和化学组分进行筛选. 研究涉及的化学组分最终包括: $\text{PM}_{2.5}$ 、OC、EC、 NH_4^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 F^- 、 SO_4^{2-} 和 NO_3^- 等 11 种组分.

1.5 后向轨迹及潜在源模型

本研究使用 Meteoinfo 软件对 $\text{PM}_{2.5}$ 、OC、EC 和 TWSIs 进行后向轨迹聚类、WPSCF 和 WCWT 计

算. 本文以渭南为模拟受点, 选择 500 m 模拟高度作为边界层的平均流场, 既能反映表层气流区域流动特征又能减少地面摩擦力的影响^[31]. 模拟轨迹时长为 24 h, 时间分辨率为 1 h. 气象数据来源于美国国家海洋和大气管理局 (national oceanic and atmospheric administration, NOAA) 环境预报中心 (national centers for environmental prediction, NCEP) 提供的 GDAS 数据. 选取北纬 $20^\circ \sim 80^\circ$, 东经 $60^\circ \sim 120^\circ$ 作为研究区域, 将研究区域分为 1 560 个 $1^\circ \times 1^\circ$ 的小网格, 该区域内所有轨迹数为 18 600 个, 则每个网格的平均轨迹端点数大约为 12 个, 计算公式及权重函数 W_{ij} 的取值为^[32]:

$$\text{PSCF}_{ij} = m_{ij}/n_{ij} \quad (9)$$

$$\text{CWT}_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^{n_{ij}} (C_k \times a_{ijk})}{\sum_{k=1}^{n_{ij}} a_{ijk}} \quad (10)$$

$$\text{WPSCF}_{ij} = W_{ij} \times \text{PSCF}_{ij} \quad (11)$$

$$\text{WCWT}_{ij} = W_{ij} \times \text{CWT}_{ij} \quad (12)$$

$$W_{ij} = \begin{cases} 1.00, & 80 < n_{ij} \\ 0.72, & 20 < n_{ij} \leq 80 \\ 0.42, & 10 < n_{ij} \leq 20 \\ 0.05, & 0 < n_{ij} \leq 10 \end{cases}$$

式中, n_{ij} 为经过网格 (i, j) 的轨迹总数; m_{ij} 为经过这些网格的污染轨迹数; CWT_{ij} 为网格 (i, j) 的平均污染权重浓度; C_k 为轨迹 k 经过网格时对应的污染物浓度, $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; a_{ijk} 为轨迹 k 在网格 (i, j) 停留的时间, h.

本研究中, $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 所选阈值为《环境空气质量标准》的二级标准限值: $75 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, $\rho(\text{OC})$ 、 $\rho(\text{EC})$ 和 $\rho(\text{TWSIs})$ 的污染阈值取均值的 70%, 分别取: 11.91、4.35 和 $29.70 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.

2 结果与讨论

2.1 $\text{PM}_{2.5}$ 及其组分污染特征

2.1.1 $\text{PM}_{2.5}$ 、OC、EC 浓度特征

冬季采样期间, 白天和夜间 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 分别介于 $40.56 \sim 275.80 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $41.85 \sim 235.86 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 之间, 平均值分别为 $130.66 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $119.08 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 是《环境空气质量标准》中二级标准限值的 0.77 倍和 0.87 倍. 从图 2(a) 可见, 采样期间 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度白天略高于夜间, 但总体差异不大, 均出现了较严重的空气污染, 说明空气质量水平较差. 白天和夜间 $\rho(\text{OC})$ 分别介于 $2.83 \sim 38.17 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $3.95 \sim 28.60 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 之间, 平均值分别为 $18.09 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $17.02 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; $\rho(\text{EC})$ 分别介于 $1.02 \sim 13.69 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $1.72 \sim 10.86 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 之间, 平均值分别为

6.22 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 6.20 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 从图 2(a) ~ 2(c) 可见, PM_{2.5}、OC 和 EC 总体呈现出白天略高于夜间的趋势, 这与印度坎普尔冬季^[33] 及中国太原冬季^[34] OC、EC 浓度夜间高于白天的趋势略有不同, 可能是与白天机动车尾气, 生物质燃烧等一次污染物排放量有关; 另一方面, 冬季昼夜温差大, 白天温度较高, 太阳辐射较夜间强, 因而有利于二次有机碳的生成^[33,14].

依据《环境空气质量标准》中 PM_{2.5} 的日浓度平均值标准限值划分污染等级, 在采样期间共出现 5 次重度污染天气, 即 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 的日平均值 $\geq 150 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 第一次重污染天气出现在 12 月 22 日, 第二次重污染天气出现在 12 月 26 ~ 28 日, 第三次重污染天气出现在 1 月 2 ~ 4 日, 第四次重污染天气出现在 1 月 10 ~ 11 日, 第五次重污染天气出现在 1 月 14 日. 其中第三次重污染天气持续时间长, 污染严重, 且能完整反映污染物的整个发展过程, 即污染发展阶段(2020 年 12 月 30 日至 2021 年 1 月 1 日)、维持阶段(2021 年 1 月 2 ~ 4 日)和消散阶段(2021 年 1 月 5 ~ 7 日), 而其他几次污染天气 PM_{2.5} 的日均浓度变化显著, 持续时间短, 无法完整反映整个污染

过程, 基于此, 对第三次重污染阶段 PM_{2.5} 的化学组分进行详细论述. 在污染发展阶段, 夜间和白天 PM_{2.5}、OC 和 EC 浓度均呈现明显增加趋势; 在维持阶段, 夜间 PM_{2.5}、OC 和 EC 浓度开始出现明显下降, 白天则呈缓慢上升趋势; 在污染消散阶段, 白天 PM_{2.5}、OC 和 EC 浓度骤降之后出现平缓的波动, 而夜间出现略微波动, 但整体呈下降趋势.

如表 1 所示, 与国内其他城市相比, 渭南冬季 PM_{2.5} 浓度平均值接近于保定^[35], 高于阳泉^[36]、石家庄^[37]、临安^[38] 和嘉兴^[39] 等城市, 低于西安^[17]、太原^[40]、南京^[38] 和苏州^[38] 等城市. PM_{2.5} 浓度平均值虽然低于西安、太原等大型工业城市, 但仍高于《环境空气质量标准》的二级限值. 从图 2(a) 可以看出采样期间 PM_{2.5} 浓度仅有 5 d 低于《环境空气质量标准》二级限值, 说明 PM_{2.5} 的污染仍然比较严重. OC 浓度平均值接近宝鸡^[41], 仅高于阳泉^[36] 和嘉兴^[39], 属于较低的水平. EC 浓度平均值低于石家庄^[37]、西安^[17]、太原^[40] 和苏州^[38], 但仍然高于保定^[35]、阳泉^[36]、宝鸡^[41]、临安^[38]、南京^[38] 和嘉兴^[39]. 综上所述, 渭南仍属于汾渭平原污染较严重城市.

表 1 国内其他城市 PM_{2.5}、OC 和 EC 浓度/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$
Table 1 PM_{2.5}, OC, and EC concentrations in other cities in China/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

地点	采样点	年份	PM _{2.5}	OC	EC	文献
京津冀及周边地区	保定	2019	126.60	36.63	6.07	[35]
	阳泉	2018	74.00 ± 28.60	9.80 ± 2.90	4.60 ± 1.70	[36]
	石家庄	2017 ~ 2018	110.60 ± 71.60	39.90 ± 20.40	9.30 ± 3.60	[37]
汾渭平原	宝鸡	2018 ~ 2019	缺值	18.20 ± 10.40	4.60 ± 3.00	[41]
	西安	2017	145.43 ± 96.28	29.02 ± 14.01	6.96 ± 4.16	[17]
	太原	2010	289.20 ± 104.8	65.20 ± 22.10	23.50 ± 8.20	[40]
长三角地区	临安	2015	123.56 ± 61.11	21.93 ± 11.69	6.00 ± 3.60	[38]
	南京	2015	144.77 ± 62.91	20.32 ± 10.30	5.39 ± 3.07	[38]
	苏州	2015	156.50 ± 68.97	27.08 ± 14.35	6.40 ± 4.29	[38]
	嘉兴	2019	37.00	5.63	1.57	[39]

2.1.2 OC、EC 比值及 SOC 的估算

依据 OC/EC 的不同, 可以确定碳质气溶胶不同的来源^[42]. 当 OC/EC 介于 1.2 ~ 4.2 之间时, 表示有柴油和汽油车尾气排放^[43]; 当 OC/EC 介于 3.8 ~ 13.2 之间时, 表示有生物质燃烧排放^[44]; 当 OC/EC 介于 2.5 ~ 10.5 之间时, 表示有燃煤排放; 当 OC/EC 介于 32.9 ~ 81.6 之间时, 表示有烹调排放^[45]; 当 OC/EC 为 13.1 左右时, 表明有地面扬尘来源; 当 OC/EC 为 12.7 左右时, 表明有家庭天然气排放; 当 OC/EC 为 7.7 左右时, 则表示有木材燃烧排放^[42]. 由图 2(d) 可以看出 OC/EC 总体呈现白天大于夜间的趋势, 且比值均处于 1.31 ~ 4.47 之间. 由此可见渭

南冬季污染可能受柴油和汽油车尾气排放、燃煤和生物质燃烧排放的影响. 渭南污染来源同汾渭平原其他典型城市如宝鸡^[41] 和西安^[17] 具有相似的污染来源特征, 这说明汾渭平原典型城市可能受交通污染影响严重. OC 和 EC 的相关性可以用来判断 OC 和 EC 来源是否一致^[46]. 从图 3 可以看出, OC 和 EC 呈线性相关, 昼夜的相关系数 R^2 分别为 0.87 和 0.91, 表明昼夜均具有较强的相关性, 说明渭南冬季采样期间空气中碳质组分的来源较为一致.

为了解渭南冬季污染物的主要来源, 对 PM_{2.5} 中 8 个碳组分进行主成分分析, 分析结果见表 2. 白天因子 1 中高载荷组分为 OC1、OC2、OC3、OC4 和

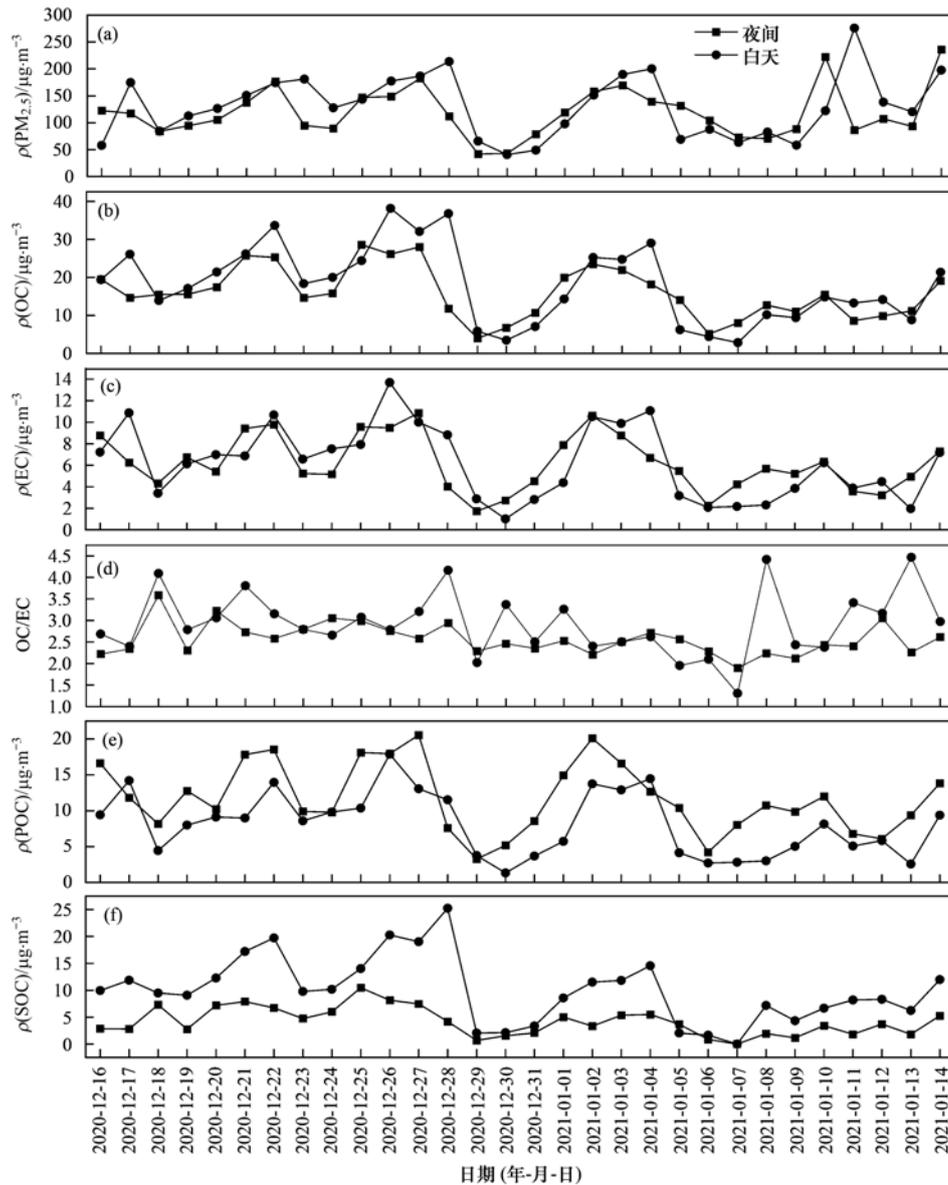


图2 渭南冬季 $PM_{2.5}$ 、OC、EC、POC 和 SOC 昼夜浓度及 OC/EC

Fig. 2 Diurnal concentrations of $PM_{2.5}$, OC, EC, POC, and SOC in winter and the OC/EC values in Weinan City

EC1, 分别达到了 95.6%、97.1%、97.1%、95.7% 和 92.8%, 因此因子 1 代表生物质燃烧源和汽油车尾气污染源的混合源. 夜间因子 1 的高载荷组分为 OC1、OC2、OC3、OC4 和 EC1, 分别达到了 97.0%、98.6%、98.0%、95.4% 和 94.5%, 因此夜间因子 1 代表生物质燃烧源和汽油车尾气污染源的混合源, 而因子 2 中统计出的高载荷组分为 EC2 和 EC3, 二者都达到了 0.89%, 因此因子 2 代表了柴油车尾气来源. 通过主成分分析发现, 渭南采样期间白天污染物的主要来源为生物质燃烧和汽油车尾气, 这是因为白天人类活动频繁, 加上冬季取暖所致. 夜间不仅受生物质燃烧及汽油车尾气排放的影响, 还受到柴油车尾气排放的影响, 这可能是由于夜间重型卡车运输车辆, 建筑垃圾搬运等车辆较多导致. 总之, 渭南冬季污染物主要来源为生物质燃烧排放, 柴油车

和汽油车尾气排放.

由图 2(d) 可以看出, 除 2021 年 1 月 7 日昼夜的 OC/EC (1.31 和 1.89) 和 1 月 5 日白天的 OC/EC (1.95) 小于 2 之外, 其余采样日的 OC/EC 均大于 2, 说明采样期间有 SOC 的生成. 渭南冬季白天 OC/EC 为 2.93, 夜间为 2.57; 白天和夜间 $\rho(\text{POC})$ 分别为 $8.13 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $11.75 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 日平均值为 $9.94 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; 白天和夜间 $\rho(\text{SOC})$ 分别为 $9.96 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $4.19 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 日平均值为 $7.08 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 从图 2(d) ~ 2(f) 可以明显看到, 除个别采样日期外, OC/EC 和 SOC 白天明显高于夜间, 而 POC 则呈现出夜间高于白天的趋势, 这可能是由于夜间气温较低, 大气稳定, 大气光化学反应活性差, 不利于二次反应的进行, 而夜间大型运输车辆增多, 居民夜间取暖燃煤量大.

表 2 主成分载荷矩阵

Table 2 Principal component load matrix

	白天		夜间	
	因子1	因子2	因子1	因子2
OC1	0.956		0.970	-0.002
OC2	0.971		0.986	-0.028
OC3	0.971		0.980	0.060
OC4	0.957		0.954	-0.004
EC1	0.928		0.945	-0.038
EC2	0.437		-0.033	0.890
EC3	0.490		0.045	0.890
贡献率/%	71.55		66.83	22.72
特征值	5.008		4.678	1.590
来源	生物质燃烧 + 汽油车尾气		生物质燃烧 + 汽油车尾气 柴油车尾气	

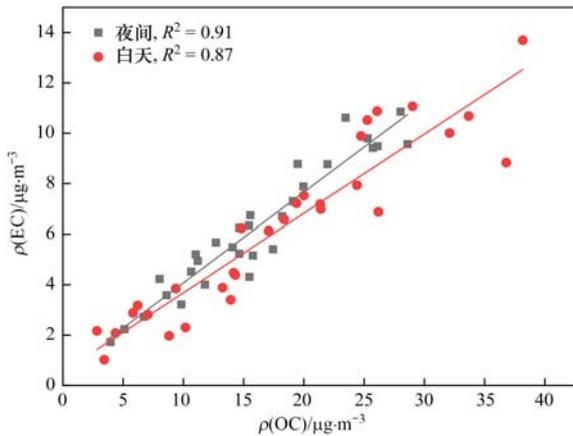


图 3 采样期间白天和夜间的 OC 和 EC 相关性

Fig. 3 Day and night OC and EC correlations during the sampling period

2.1.3 无机离子污染特征

观测期间,白天和夜间 ρ (TWSIIs) 分别为 50.645 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 34.198 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,9 种水溶性离子浓度表现为,白天: $\text{F}^- > \text{NO}_3^- > \text{Ca}^{2+} > \text{SO}_4^{2-} > \text{Na}^+ > \text{Cl}^- > \text{NH}_4^+ > \text{K}^+ > \text{Mg}^{2+}$,日平均值依次为: 11.598、10.385、8.554、8.315、7.959、3.476、3.180、1.200 和 0.482 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; 夜间: $\text{NO}_3^- > \text{SO}_4^{2-}$

$> \text{Ca}^{2+} > \text{NH}_4^+ > \text{F}^- > \text{Na}^+ > \text{Cl}^- > \text{K}^+ > \text{Mg}^{2+}$,日平均值依次为: 11.720、6.029、5.258、4.331、4.190、3.699、1.843、0.575 和 0.279 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 白天 PM_{2.5} 中主要的水溶性离子为 F^- 、 NO_3^- 、 Ca^{2+} 和 SO_4^{2-} ,而夜间的主要水溶性离子为: NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 Ca^{2+} 和 NH_4^+ . 渭南冬季 NO_3^- 浓度高,这和西安冬季 NO_3^- 贡献高类似^[47]. 而 NO_3^- 浓度较高的原因一方面可能是冬季温度低,汽油等燃料不能充分燃烧,加剧了硝酸盐前体物 NO_x 的排放;另一方面,冬季低温抑制了 NO_3^- 的挥发^[48]. Ca^{2+} 是建筑粉尘、道路扬尘的示踪物^[49],渭南冬季干旱少雨,且冬季植被较少,土地裸露,因而 Ca^{2+} 偏高可能受采样点地表扬尘以及宁夏等地区远距离沙尘传输的影响. 在后向轨迹分析中也发现西北方向的气团对渭南大气污染物浓度起着显著的补充作用. 白天 F^- 浓度高而夜间 F^- 浓度较低, F^- 是燃煤和工业排放的示踪物^[50],是由于白天受工业排放影响较大. 气溶胶中 $\text{NO}_3^-/\text{SO}_4^{2-}$ 可以判断固定源(如煤炭燃烧)和移动源(如汽车尾气)贡献大小^[51],当 $\text{NO}_3^-/\text{SO}_4^{2-}$ 大于 1 时,移动源的贡献大于固定源;反之,固定源的贡献量更大. 采样期间夜间和白天 $\text{NO}_3^-/\text{SO}_4^{2-}$ 分别为 1.94 和 1.25,说明渭南冬季机动车尾气等移动源的影响大于固定源. 通过酸碱度计算,采样期间白天 AE/CE 为 1.027,夜间 AE/CE 为 0.836,白天颗粒物呈酸性,而夜间颗粒物呈碱性.

NH_4^+ 与 NO_3^- 和 SO_4^{2-} 之间的相关性一定程度上可以反映大气气溶胶的结合方式及其来源^[52]. 从图 4 可知,采样期间白天 NH_4^+ 与 SO_4^{2-} 和 NO_3^- 的相关系数 R^2 分别为 0.04 和 0.07,夜间为 0.09 和 0.65. 在夜间 NH_4^+ 和 NO_3^- 的相关性水平最高 ($R^2 = 0.65$),由此可知,大气气溶胶中 NH_4^+ 和 NO_3^- 在夜间主要以 NH_4NO_3 的形式存在. SOR 和 NOR 分别

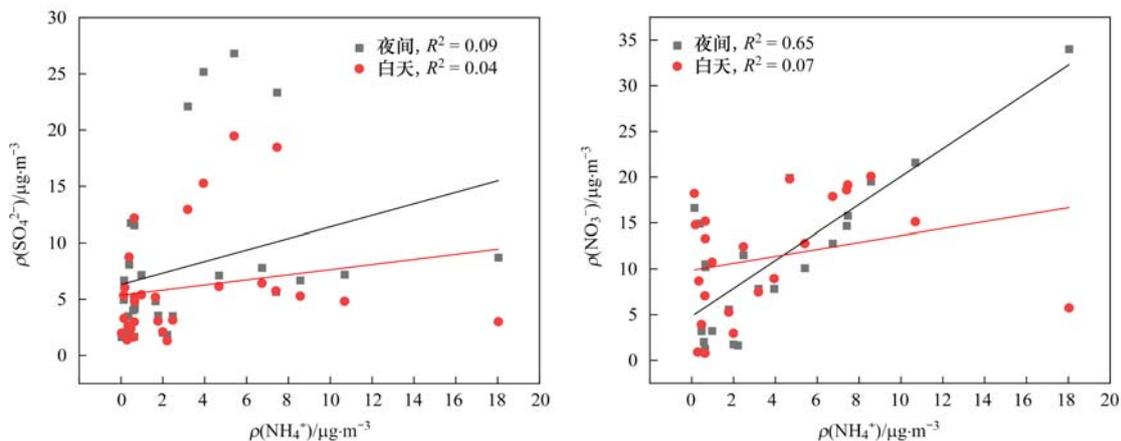


图 4 采样期间白天和夜间 NH₄⁺ 与 SO₄²⁻ 和 NO₃⁻ 相关性

Fig. 4 Day and night NH₄⁺ correlation with SO₄²⁻ and NO₃⁻ during the sampling period

表示 SO_2 和 NO_2 向二次离子 SO_4^{2-} 和 NO_3^- 的转化程度,采样期间 SOR 和 NOR 的平均值分别为 0.203 和 0.09,说明 SO_2 和 NO_2 的二次转化程度较低,与国内其他城市相比,渭南 SOR 和 NOR 显著低于安阳(0.37 和 0.25)^[52]、郑州(0.35 和 0.19)^[28]、苏州(0.25 和 0.14)^[53] 和成都(0.31 和 0.13)^[54]. 通过对不同污染阶段 SOR 和 NOR 的分析发现,在整个污染过程中,即污染发展阶段、污染维持阶段和污染消散阶段, SOR 的平均值变化差异不大,均处于较低水平(0.11、0.14 和 0.13), NOR 在污染维

持阶段值较高(0.15),说明只有在污染维持阶段, NO_2 的二次转化程度才相对较高.

2.2 PMF 源解析

利用 PMF 模型分别解析渭南采样期间白天和夜间 $\text{PM}_{2.5}$ 的潜在来源,通过分析比较,最终白天和夜间均确定 4 种因子,包括燃煤源、扬尘源、工业排放源和二次源(图 5). 白天 $\text{PM}_{2.5}$ 解析过程中因子 1 的 OC、EC 和 NO_3^- 贡献率较高, NO_3^- 为二次硝酸盐源, NO_3^- 由 NO_x 氧化生成,且较低温度有利于硝酸铵气溶胶的生成^[55],因此硝酸盐在冬季浓度较高.

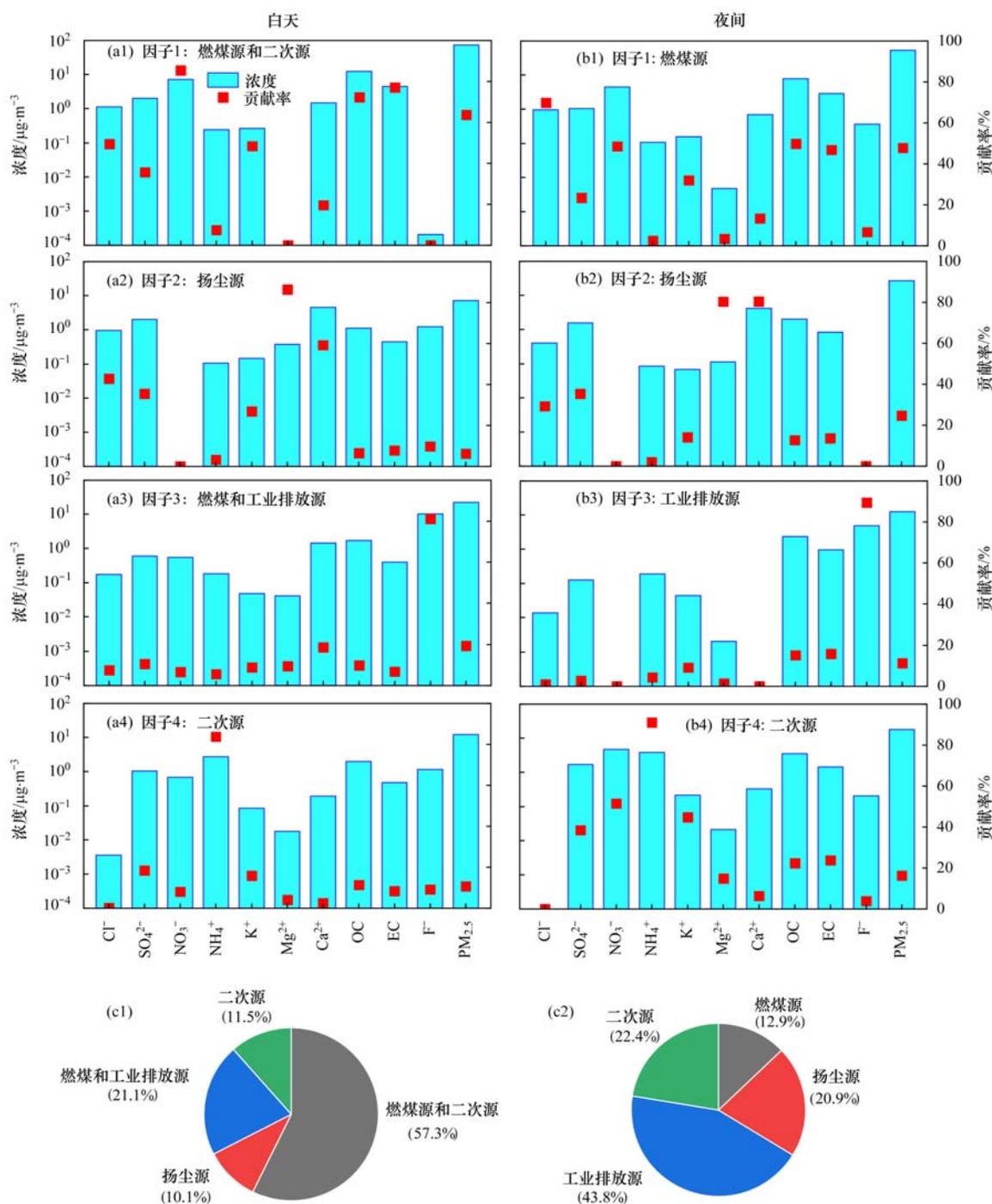


图 5 PMF 解出的源谱和来源贡献率

Fig. 5 Source spectrum and contribution rate resolved by PMF

然而因子 1 中 OC 和 EC 也存在较高的贡献率,因此因子 1 可能是生物质燃烧、工业排放和道路扬尘等产生的二次气溶胶^[56]. 因子 2 中 Ca²⁺ 和 Mg²⁺ 贡献较高,因此因子 2 为扬尘源. 因子 3 中 F⁻ 贡献率最高, F⁻ 是燃煤和工业排放的示踪物^[50], 因此因子 3 为燃煤源和工业排放源. 因子 4 为二次源, NH₄⁺ 贡献率最高. 总之,渭南冬季白天 PM_{2.5} 来源包括燃煤和工业排放源、扬尘源和二次源. 夜间 PM_{2.5} 解析过程中因子 1 中 Cl⁻ 表现出较高的贡献率,而 Cl⁻ 受冬季燃煤影响^[57], 因此因子 1 可归因于燃煤源. 因子 2 与白天相同, Ca²⁺ 和 Mg²⁺ 贡献较高, 因子 2 为扬尘源. 因子 3 为燃煤和工业排放源, F⁻ 贡献率最高. 因子 4 为二次源, NH₄⁺ 贡献率最高.

根据以上分析结果, PM_{2.5} 中各组分污染源的贡献率如图 5 所示. 渭南白天 PM_{2.5} 来源为: 燃煤源和二次源混合源 (57.3%) > 燃煤和工业排放源 (21.1%) > 二次源 (11.5%) > 扬尘源 (10.1%). 而夜间为: 工业排放源 (43.8%) > 二次源 (22.4%) > 扬尘源 (20.9%) > 燃煤源 (12.9%). 可见渭南白天对 PM_{2.5} 贡献最大的为燃煤源和二次源, 夜间对 PM_{2.5} 来源贡献最大的为工业排放源. 但总体来看, 渭南冬季 PM_{2.5} 都受燃煤和工业排放源、扬尘源和二次源的影响.

2.3 后向轨迹模型和聚类分析

2.3.1 污染物轨迹聚类分析

渭南冬季主要以 PM_{2.5} 污染为主, 因此选择 2020 年 12 月 16 日至 2021 年 1 月 14 日为 PM_{2.5} 污染时段研究 PM_{2.5}、OC、EC 和 TWSIIs 的潜在源区.

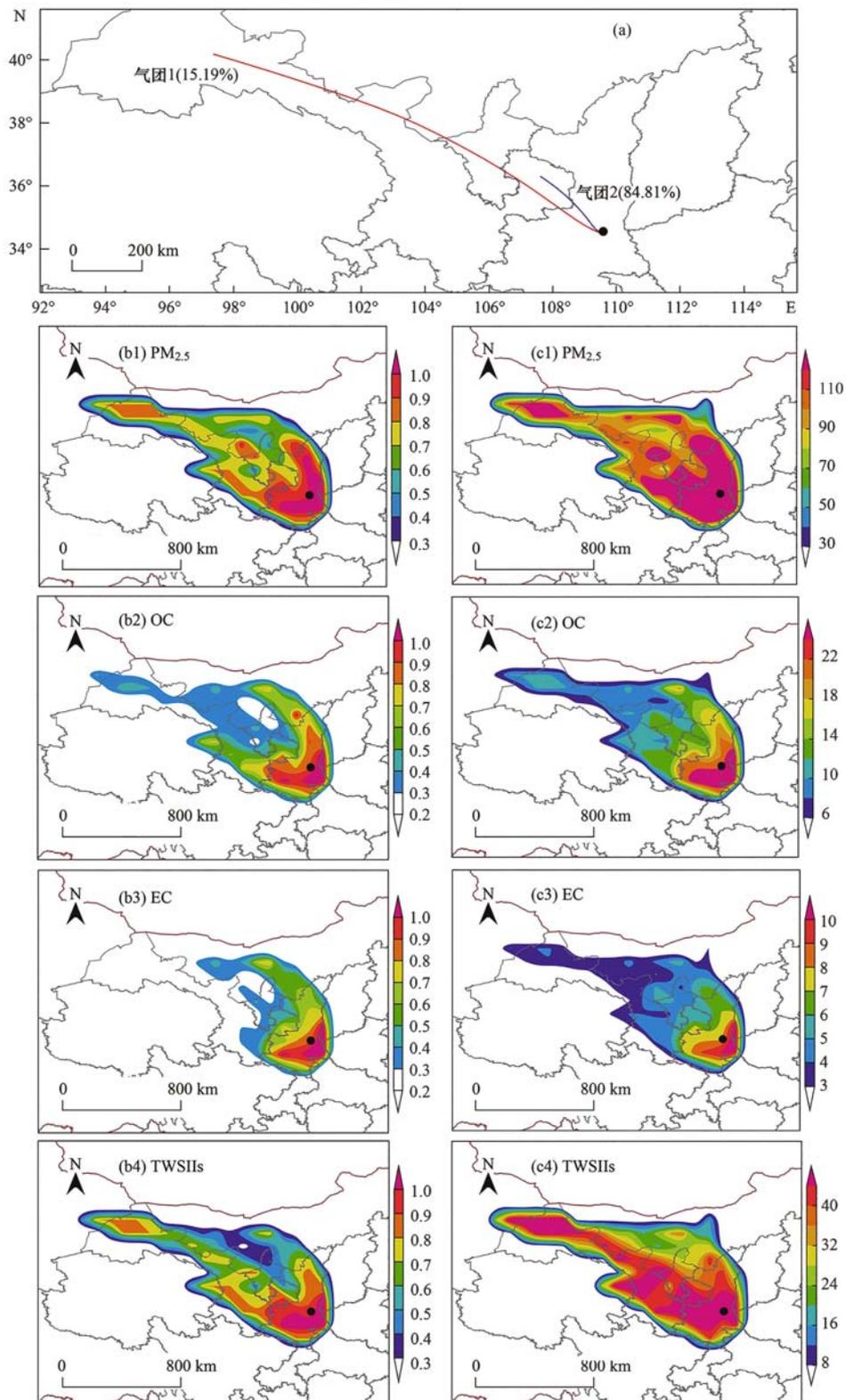
利用 Trajstst 软件的 EUCLIDEN 算法对气流轨迹进行聚类, 图 6(a) 为渭南 2020 年 12 月 16 日至 2021 年 1 月 14 日后向轨迹聚类结果, 共得到 2 条聚类轨迹. 气团 1 为西北长距离传输气团, 占冬季气流轨迹的 15.19%, 该气团起源于甘肃省西北方向, 途经内蒙古西南部, 横跨宁夏回族自治区, 最终进入观测点位. 这类气团传输速率大, 传输距离远, 连续且稳定, 会导致污染物积累, 故这类气团携带的污染物浓度大. 气团 2 为陕西省本地气团, 这类气团传输距离较近, 占比最大, 达到了 84.81%, 该气团主要来自渭南邻近城市铜川、咸阳和西安等以及邻近陕西省的宁夏南部城市, 这类气团可能受人类活动影响大.

2.3.2 PM_{2.5}、OC、EC 和 TWSIIs 潜在源区与污染程度分析

为了了解渭南冬季污染的潜在源区, 对渭南 2020 年 12 月 16 日至 2021 年 1 月 14 日 PM_{2.5}、OC、EC 和 TWSIIs 进行 WPSCF 分析, 如图 6(b1) ~ 6

(b4), 颜色越深则代表潜在源区输送气团的贡献越大^[58]. 由图 6(b1) 可以看出 PM_{2.5} 的潜在源区包括陕西省、宁夏回族自治区、甘肃省和内蒙古西部地区. 由于渭南冬季受西伯利亚寒流的影响, 盛行西北风, 在风力作用下, 会将腾格里沙漠沙尘传输至渭南. 而且 WPSCF 大于 0.9 的高值区主要分布在渭南本地及邻近城市如咸阳、西安、铜川和商洛等地, 宁夏中部地区和腾格里沙漠. 综上所述, 渭南冬季受西北方向气团影响, PM_{2.5} 的来源主要是陕西省本地、宁夏中部地区和内蒙古腾格里沙漠. 由图 6(b2) 可以看出 OC 的潜在源区包括陕西省、甘肃省、宁夏部分地区及内蒙古西南方向, 而 WPSCF 大于 0.9 的高值区主要为渭南本地. 由图 6(b3) 可以看出 EC 的潜在源区包括陕西省、宁夏和陕西交界地区、宁夏地区及内蒙古西南方向部分地区, 而 WPSCF 大于 0.9 的高值区分布在渭南本地. 由图 6(b4) 可以看出 TWSIIs 的潜在源区与 PM_{2.5} 的潜在源区基本一致, 主要包括陕西省、宁夏回族自治区、甘肃省和内蒙古西部地区, 而 WPSCF 大于 0.9 的高值区主要分布在渭南本地及邻近城市. 总之, OC、EC 和 TWSIIs 的主要贡献源区为渭南本地, 这是由于采样点位于渭南内, 人口密集, 可能受人为影响大. 同时, TWSIIs 的潜在源区分布范围最大, 其次是 OC, 分布范围最小的为 EC, 这可能是由于 TWSIIs 是 PM_{2.5} 的主要成分, 因此其潜在源区和 PM_{2.5} 相似, 分布范围最广. OC 的潜在源区分布范围较 EC 大, 这可能是由于 OC 的来源非常复杂, 而 EC 主要由污染物直接排放产生导致的.

为了进一步验证 WPSCF 的分析结果, 使用 WCWT 进行浓度权重轨迹分析, 得到污染物潜在源区的污染浓度贡献水平. 颜色越深, 代表污染物浓度贡献越大. 图 6(c1) ~ 6(c4) 依次为 PM_{2.5}、OC、EC 和 TWSIIs 的 WCWT 图. 图 6(c1) 可以看出渭南冬季 PM_{2.5} 浓度贡献较大的区域为陕西省、宁夏回族自治区、甘肃省和内蒙古西部地区. 而 WCWT 值超过 110 μg·m⁻³ 的地区为陕西省中部、宁夏部分地区、内蒙古腾格里沙漠和甘肃省西北方向、南部、陕西和宁夏交界地区. 图 6(c2) 可以看出渭南冬季 OC 污染潜在贡献较大的区域为陕西省、甘肃省、宁夏部分地区及内蒙古西南方向. 而 WCWT 值超过 22 μg·m⁻³ 的地区为渭南本地. 图 6(c3) 可以看出渭南冬季 EC 污染潜在贡献较大的区域与 OC 基本一致, 而 WCWT 值超过 9 μg·m⁻³ 的地区同样为渭南本地. 图 6(c4) 可以看出渭南冬季 TWSIIs 污染浓度贡献较大的区域为陕西省、宁夏回族自治区、甘肃省和内蒙古地区. WCWT 值超过 40



(b) 中色柱表示 WPSCF 值; (c) 中色柱表示 WCWT 值, 单位为 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; 黑色圆点表示渭南

图 6 采样期间的轨迹聚类 and $\text{PM}_{2.5}$ 、OC、EC 和 TWSIIs 的 WPSCF 和 WCWT 图

Fig. 6 Trajectory clustering during sampling, WPSCF of $\text{PM}_{2.5}$, OC, EC, and TWSIIs, and WCWT of $\text{PM}_{2.5}$, OC, EC, and TWSIIs

$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的地区为陕西省中南部、宁夏部分地区、甘肃省西北方向、中部、南部、陕西和宁夏交界地区。综上所述,渭南冬季 $\text{PM}_{2.5}$ 和 TWSIIs 污染潜在贡献区域较为一致,其中贡献较大的区域主要为

陕西省中部、宁夏部分地区、内蒙古腾格里沙漠和甘肃省西北方向、南部、陕西和宁夏交界地区。而 OC 和 EC 污染潜在贡献区域较为一致,均为渭南本地。

3 结论

(1) 渭南冬季采样期间,白天 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 、 $\rho(\text{OC})$ 和 $\rho(\text{EC})$ 分别为 130.66、18.09 和 6.22 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; 夜间分别为 119.08、17.02 和 6.20 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 而且在不同污染阶段,白天和夜间 PM_{2.5}、OC 和 EC 浓度的变化规律不同.

(2) OC/EC 总体白天大于夜间,且比值均处于 1.31~4.47,说明渭南大气环境受交通污染源的影响. OC 和 EC 呈线性相关,采样期间空气中碳组分来源较为一致.

(3) 观测期间,白天和夜间 $\rho(\text{TWSIIs})$ 分别为 50.645 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 34.198 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 白天主要离子为 F^- 、 NO_3^- 、 Ca^{2+} 和 SO_4^{2-} , 夜间主要离子为 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 Ca^{2+} 和 NH_4^+ . 采样期间夜间和白天 $\text{NO}_3^-/\text{SO}_4^{2-}$ 分别为 1.94 和 1.25,说明渭南冬季机动车尾气等移动源的影响大于固定源. 白天 PM_{2.5} 呈酸性,夜间 PM_{2.5} 呈碱性. 渭南夜间铵盐主要以 NH_4NO_3 形式存在.

(4) 不同污染阶段 SOR 变化差异不大, NOR 只有在污染维持阶段较高(0.15),说明只有在污染维持阶段, NO_2 的二次转化程度才相对较高.

(5) 通过来源解析,渭南冬季 PM_{2.5} 来自燃煤源、工业排放源、扬尘源和二次源. 冬季主要受西北远距离传输和陕西省局部污染排放影响.

参考文献:

- [1] Alves C, Evtugina M, Vicente E, *et al.* PM_{2.5} chemical composition and health risks by inhalation near a chemical complex[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2023, **124**: 860-874.
- [2] Schlesinger R B, Kunzli N, Hidy G M, *et al.* The health relevance of ambient particulate matter characteristics: coherence of toxicological and epidemiological inferences[J]. *Inhalation Toxicology*, 2006, **18**(2): 95-125.
- [3] Jerrett M. The death toll from air-pollution sources[J]. *Nature*, 2015, **525**(7569): 330-331.
- [4] Pachauri T, Singla V, Satsangi A, *et al.* Characterization of carbonaceous aerosols with special reference to episodic events at Agra, India[J]. *Atmospheric Research*, 2013, **128**: 98-110.
- [5] Jimenez J L, Canagaratna M R, Donahue N M, *et al.* Evolution of organic aerosols in the atmosphere[J]. *Science*, 2009, **326**(5959): 1525-1529.
- [6] Pandis S N, Harley R A, Cass G R, *et al.* Secondary organic aerosol formation and transport[J]. *Atmospheric Environment. Part A. General Topics*, 1992, **26**(13): 2269-2282.
- [7] 冯炎鹏, 张军科, 黄小娟, 等. 成都夏季冬季 PM_{2.5} 中水溶性无机离子污染特征[J]. *环境科学*, 2020, **41**(7): 3012-3020.
- [8] Cheng Y, Zhang J K, Huang X J, *et al.* Pollution characteristics of water-soluble inorganic ions in Chengdu in summer and winter[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(7): 3012-3020.
- [9] 崔宏, 刘肖, 秦巧燕. 汾渭平原典型污染城市 PM_{2.5} 来源对 contribution to ambient aerosol during heating season in a megacity in Northeast China: Effectiveness of agricultural fire bans? [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **754**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.142144.
- [9] Liu P, Zhou H J, Chun X, *et al.* Characteristics of fine carbonaceous aerosols in Wuhai, a resource-based city in Northern China: insights from energy efficiency and population density[J]. *Environmental Pollution*, 2022, **292**, doi: 10.1016/j.envpol.2021.118368.
- [10] Zhao H Y Z, Niu Z C, Zhou W J, *et al.* Measurement report: Source apportionment of carbonaceous aerosol using dual-carbon isotopes(¹³C and ¹⁴C) and levoglucosan in three northern Chinese cities during 2018-2019 [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2022, **22**(9): 6255-6274.
- [11] Shimada K, Takami A, Ishida T, *et al.* Long-term measurements of carbonaceous aerosol at Cape Hedo, Okinawa, Japan: Effects of changes in emissions in East Asia[J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2021, **21**(9), doi: 10.4209/aaqr.200505.
- [12] Ravindra K, Singh T, Mandal T K, *et al.* Seasonal variations in carbonaceous species of PM_{2.5} aerosols at an urban location situated in Indo-Gangetic Plain and its relationship with transport pathways, including the potential sources [J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, **303**, doi: 10.1016/j.jenvman.2021.114049.
- [13] Ji D S, Gao M, Maenhaut W, *et al.* The carbonaceous aerosol levels still remain a challenge in the Beijing-Tianjin-Hebei region of China: Insights from continuous high temporal resolution measurements in multiple cities[J]. *Environment International*, 2019, **126**: 171-183.
- [14] Wang M, Duan Y S, Xu W, *et al.* Measurement report: Characterisation and sources of the secondary organic carbon in a Chinese megacity over 5 years from 2016 to 2020 [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2022, **22**(19): 12789-12802.
- [15] Wang J Z, Ho S S H, Ma S X, *et al.* Characterization of PM_{2.5} in Guangzhou, China: Uses of organic markers for supporting source apportionment [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **550**: 961-971.
- [16] 刘旻霞, 李亮, 于瑞新, 等. 汾渭平原吸收性气溶胶时空演化及潜在源区分析[J]. *环境科学*, 2021, **42**(6): 2634-2647.
- [16] Liu M X, Li L, Yu R X, *et al.* Spatio-temporal patterns and potential sources of absorbing aerosols in the Fenwei Plain [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(6): 2634-2647.
- [17] 牟臻, 陈庆彩, 王羽琴, 等. 西安市 PM_{2.5} 中碳质气溶胶污染特征[J]. *环境科学*, 2019, **40**(4): 1529-1536.
- [17] Mou Z, Chen Q C, Wang Y Q, *et al.* Characteristics of carbonaceous aerosol pollution in PM_{2.5} in Xi'an [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(4): 1529-1536.
- [18] Chang Y H, Deng C R, Cao F, *et al.* Assessment of carbonaceous aerosols in Shanghai, China-Part 1: long-term evolution, seasonal variations, and meteorological effects[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2017, **17**(16): 9945-9964.
- [19] 杨毅红, 瞿群, 刘随心, 等. 夏季珠江三角洲地区 PM_{2.5} 化学组分特征及其对大气能见度的影响[J]. *环境科学*, 2015, **36**(8): 2758-2767.
- [19] Yang Y H, Qu Q, Liu S X, *et al.* Chemical compositions in PM_{2.5} and its impact on visibility in summer in Pearl River Delta, China[J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(8): 2758-2767.
- [20] 崔宏, 刘肖, 秦巧燕. 汾渭平原典型污染城市 PM_{2.5} 来源分

- 布及传输分析[J]. 环境工程技术学报, 2022, **12**(5): 1593-1600.
- Cui H, Liu X, Qin Q Y. PM_{2.5} source distribution and transmission analysis in typical polluted cities of Fenwei Plain [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2022, **12**(5): 1593-1600.
- [21] 高兴艾, 裴坤宁, 王淑敏, 等. 汾渭平原吕梁市颗粒物潜在源及输送通道分析[J]. 中国环境科学, 2022, **42**(7): 2988-2999.
- Gao X A, Pei K N, Wang S M, *et al.* Analysis on the potential source and transmission channel of particulate matter in Lüliang City, Fenwei Plain [J]. China Environmental Science, 2022, **42**(7): 2988-2999.
- [22] 高星星, 桂海林, 王楠, 等. 汾渭平原一次沙尘和人为混合空气污染过程分析[J]. 气象与环境学报, 2021, **37**(1): 1-8.
- Gao X X, Gui H L, Wang N, *et al.* Analysis of an air pollution event due to dust and anthropogenic emission in Fenwei Plain [J]. Journal of Meteorology and Environment, 2021, **37**(1): 1-8.
- [23] Chow J C, Watson J G, Pritchett L C, *et al.* The DRI thermal/optical reflectance carbon analysis system: description, evaluation and applications in U. S. air quality studies [J]. Atmospheric Environment. Part A. General Topics, 1993, **27**(8): 1185-1201.
- [24] Chow J C, Watson J G, Chen L W A, *et al.* The IMPROVE_A temperature protocol for thermal/optical carbon analysis: maintaining consistency with a long-term database [J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2007, **57**(9): 1014-1023.
- [25] Wu C, Wu D, Yu J Z. Estimation and uncertainty analysis of secondary organic carbon using 1 year of hourly organic and elemental carbon data [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2019, **124**(5): 2774-2795.
- [26] Wu C, Yu J Z. Determination of primary combustion source organic carbon-to-elemental carbon(OC/EC) ratio using ambient OC and EC measurements: Secondary OC-EC correlation minimization method [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2016, **16**(8): 5453-5465.
- [27] Xu L L, Chen X Q, Chen J S, *et al.* Seasonal variations and chemical compositions of PM_{2.5} aerosol in the urban area of Fuzhou, China [J]. Atmospheric Research, 2012, **104-105**: 264-272.
- [28] 张俊美, 陈仕霖, 王乾恒, 等. 郑州市大气PM_{2.5}中水溶性离子的污染特征及来源解析[J]. 环境科学, 2023, **44**(2): 602-610.
- Zhang J M, Chen S L, Wang Q H, *et al.* Pollution characteristics and sources of water-soluble ions in PM_{2.5} in Zhengzhou City [J]. Environmental Science, 2023, **44**(2): 602-610.
- [29] Paatero P. The multilinear engine—a table-driven, least squares program for solving multilinear problems, including the *n*-way parallel factor analysis model [J]. Journal of Computational and Graphical Statistics, 1999, **8**(4): 854-888.
- [30] Ito K, Xue N, Thurston G. Spatial variation of PM_{2.5} chemical species and source-apportioned mass concentrations in New York City [J]. Atmospheric Environment, 2004, **38**(31): 5269-5282.
- [31] Polissar A V, Hopke P K, Harris J M. Source regions for atmospheric aerosol measured at Barrow, Alaska [J]. Environmental Science & Technology, 2001, **35**(21): 4214-4226.
- [32] 刘浪, 张文杰, 杜世勇, 等. 利用 SPAMS 分析北京市硫酸盐、硝酸盐和铵盐季节变化特征及潜在源区分布 [J]. 环境科学, 2016, **37**(5): 1609-1618.
- Liu L, Zhang W J, Du S Y, *et al.* Seasonal variation characteristics and potential source contribution of sulfate, nitrate and ammonium in Beijing by using Single Particle Aerosol Mass Spectrometry [J]. Environmental Science, 2016, **37**(5): 1609-1618.
- [33] Ram K, Sarin M M. Day-night variability of EC, OC, WSOC and inorganic ions in urban environment of Indo-Gangetic Plain: Implications to secondary aerosol formation [J]. Atmospheric Environment, 2011, **45**(2): 460-468.
- [34] 冯小姣, 耿红, 彭妍, 等. 太原市灰霾期间黑碳气溶胶形貌与成分分析 [J]. 地球化学, 2021, **50**(1): 75-87.
- Feng X J, Geng H, Peng Y, *et al.* Morphology and chemical composition characterization of atmospheric black carbon aerosols during haze events in urban Taiyuan, China [J]. Geochimica, 2021, **50**(1): 75-87.
- [35] 罗宇骞, 张凯, 赵好希, 等. 清洁取暖对保定市采暖期PM_{2.5}中碳质气溶胶的影响 [J]. 环境科学, 2023, **44**(6): 3063-3070.
- Luo Y Q, Zhang K, Zhao S X, *et al.* Effect of clean heating on carbonaceous aerosols in PM_{2.5} during the heating period in Baoding [J]. Environmental Science, 2022, **43**, **44**(6): 3063-3070.
- [36] 王成, 闫雨龙, 段小琳, 等. 阳泉市PM_{2.5}中碳质气溶胶污染特征及来源分析 [J]. 环境化学, 2021, **40**(5): 1442-1451.
- Wang C, Yan Y L, Duan X L, *et al.* Pollution characteristics and sources analysis of carbonaceous aerosols in PM_{2.5} in Yangquan [J]. Environmental Chemistry, 2021, **40**(5): 1442-1451.
- [37] 卢晶晶. 石家庄市黑碳气溶胶污染特征及来源分析 [D]. 石家庄: 河北科技大学, 2020. 1-38.
- Lu J J. Pollution characteristics and source apportionment of black carbon aerosol in Shijiazhuang City [D]. Shijiazhuang: Hebei University of Science & Technology, 2020. 1-38.
- [38] 康晖. 长三角典型站点冬季碳质气溶胶的污染特征和垂直分布 [D]. 南京: 南京信息工程大学, 2018. 1-38.
- Kang H. The pollution characteristics and vertical distribution of carbonaceous aerosols at the typical site during winter in the Yangtze River Delta [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2018. 1-38.
- [39] 张颖龙, 李莉, 吴伟超, 等. 嘉善冬季碳质气溶胶变化特征及其来源解析 [J]. 环境科学, 2021, **42**(9): 4116-4125.
- Zhang Y L, Li L, Wu W C, *et al.* Variation characteristics and source analysis of carbonaceous aerosols in winter in Jiashan [J]. Environmental Science, 2021, **42**(9): 4116-4125.
- [40] 张桂香, 闫雨龙, 郭利利, 等. 太原市大气PM_{2.5}中碳质组成及变化特征 [J]. 环境科学, 2015, **36**(3): 780-786.
- Zhang G X, Yan Y L, Guo L L, *et al.* Composition and variation characteristics of atmospheric carbonaceous species in PM_{2.5} in Taiyuan, China [J]. Environmental Science, 2015, **36**(3): 780-786.
- [41] 周变红, 王锦, 曹夏, 等. 宝鸡市冬季碳质气溶胶污染特征及来源解析 [J]. 环境化学, 2020, **39**(12): 3336-3345.
- Zhou B H, Wang J, Cao X, *et al.* Characteristics and sources of carbon fractions during winter in Baoji City [J]. Environmental Chemistry, 2020, **39**(12): 3336-3345.
- [42] Zhang Y X, Shao M, Zhang Y H, *et al.* Source profiles of particulate organic matters emitted from cereal straw burnings [J]. Journal of Environmental Sciences, 2007, **19**(2): 167-

- 175.
- [43] Schauer J J, Kleeman M J, Cass G R, *et al.* Measurement of emissions from air pollution sources. 5. C₁-C₃₂ organic compounds from gasoline-powered motor vehicles [J]. *Environmental Science & Technology*, 2002, **36** (6): 1169-1180.
- [44] Chen Y J, Zhi G R, Feng Y L, *et al.* Measurements of emission factors for primary carbonaceous particles from residential raw - coal combustion in China [J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, **33**(20), doi: 10.1029/2006GL026966.
- [45] He L Y, Hu M, Huang X F, *et al.* Measurement of emissions of fine particulate organic matter from Chinese cooking [J]. *Atmospheric Environment*, 2004, **38**(38) : 6557-6564.
- [46] Ji D S, Zhang J K, He J, *et al.* Characteristics of atmospheric organic and elemental carbon aerosols in urban Beijing, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2016, **125**: 293-306.
- [47] 李瑾, 李建军, 吴灿, 等. 关中典型城市及农村夏季 PM_{2.5} 的化学组成对比 [J]. *中国环境科学*, 2018, **38** (12): 4415-4425.
- Li J, Li J J, Wu C, *et al.* Comparison on the chemical composition of PM_{2.5} in the urban and rural regions of Guanzhong Plain, China [J]. *China Environmental Science*, 2018, **38** (12): 4415-4425.
- [48] 潘成珂, 黄韬, 高宏, 等. 张掖市城区大气细颗粒物 PM_{2.5} 的化学组成及来源解析 [J]. *环境科学*, 2022, **43**(12) : 5367-5375.
- Pan C K, Huang T, Gao H, *et al.* Chemical composition and source apportionment of PM_{2.5} in Zhangye City [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(12) : 5367-5375.
- [49] Zhou J B, Xing Z Y, Deng J J, *et al.* Characterizing and sourcing ambient PM_{2.5} over key emission regions in China I: Water-soluble ions and carbonaceous fractions [J]. *Atmospheric Environment*, 2016, **135**: 20-30.
- [50] Yang X Y, Yamada M, Tang N, *et al.* Long-range transport of fluoride in East Asia monitored at Noto Peninsula, Japan [J]. *Science of the Total Environment*, 2009, **407**(16) : 4681-4686.
- [51] Watson J G, Chow J C, Houck J E. PM_{2.5} chemical source profiles for vehicle exhaust, vegetative burning, geological material, and coal burning in Northwestern Colorado during 1995 [J]. *Chemosphere*, 2001, **43**(8) : 1141-1151.
- [52] 孙有昌, 姜楠, 王申博, 等. 安阳市大气 PM_{2.5} 中水溶性离子季节特征及来源解析 [J]. *环境科学*, 2020, **41**(1) : 75-81.
- Sun Y C, Jiang N, Wang S B, *et al.* Seasonal characteristics and source analysis of water-soluble ions in PM_{2.5} of Anyang City [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(1) : 75-81.
- [53] 王念飞, 陈阳, 郝庆菊, 等. 苏州市 PM_{2.5} 中水溶性离子的季节变化及来源分析 [J]. *环境科学*, 2016, **37** (12): 4482-4489.
- Wang N F, Chen Y, Hao Q J, *et al.* Seasonal variation and source analysis of the water-soluble inorganic ions in fine particulate matter in Suzhou [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(12) : 4482-4489.
- [54] 蒋燕, 贺光艳, 罗彬, 等. 成都平原大气颗粒物中无机水溶性离子污染特征 [J]. *环境科学*, 2016, **37**(8) : 2863-2870.
- Jiang Y, He G Y, Luo B, *et al.* Pollution characteristics of inorganic water-soluble ions in atmospheric particulate matter in Chengdu Plain [J]. *Environmental Science*, 2016, **37** (8): 2863-2870.
- [55] Li Z, Hopke P K, Husain L, *et al.* Sources of fine particle composition in New York City [J]. *Atmospheric Environment*, 2004, **38**(38) : 6521-6529.
- [56] Cesari D, Donato A, Conte M, *et al.* An inter-comparison of PM_{2.5} at urban and urban background sites: chemical characterization and source apportionment [J]. *Atmospheric Research*, 2016, **174-175**: 106-119.
- [57] Yao X H, Chan C K, Fang M, *et al.* The water-soluble ionic composition of PM_{2.5} in Shanghai and Beijing, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2002, **36**(26) : 4223-4234.
- [58] Li D P, Liu J G, Zhang J S, *et al.* Identification of long-range transport pathways and potential sources of PM_{2.5} and PM₁₀ in Beijing from 2014 to 2015 [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2017, **56**: 214-229.

CONTENTS

Meteorological Impact Assessment of PM _{2.5} and O ₃ Complex Pollution in Key Regions of China Based on Meteorological Conditions Index	YANG Xin, YANG Yuan-qin, LI Hong, <i>et al.</i>	(6433)
Scale Dependence Between PM _{2.5} and Meteorological Factors and Its Influencing Factors in "2+26" Cities	WU Shu-qi, JIN Jian-nan, ZHENG Dong-yang, <i>et al.</i>	(6441)
Chemical Constituents and Sources of PM _{2.5} Around the Wuhan Military Games Period	LIU Shi-hao, KONG Shao-fei, ZHENG Huang, <i>et al.</i>	(6452)
Characteristics and Sources of PM _{2.5} Pollution During Winter in Handan City from 2016 to 2020	NIU Hong-ya, GAO Na-na, BAO Xiao-lei, <i>et al.</i>	(6463)
Chemical Compositions and Sources of PM _{2.5} in Weinan City	GUO Jing-ning, LI Xiao-fei, YU Feng, <i>et al.</i>	(6474)
Analysis of Formation Processes and Sources of PM _{2.5} Ammonium During Winter and Summer in Suburban Area of the Yangtze River Delta	XIANG Yan-kun, CAO Fang, ZHANG Wen-qi, <i>et al.</i>	(6486)
Chemical Composition and Characterization of Nitroaromatic Compounds in Urban Areas of Shanghai	YANG Lu, MA Ying-ge, YU Jian-zhen, <i>et al.</i>	(6495)
Source Analysis and Health Risk Assessment of PAHs in PM _{2.5} , Liliang City	MU Ling, LIU Zi-ye, LI Yang-yong, <i>et al.</i>	(6508)
Effect of Biomass Burning on Carbonaceous Aerosol Composition and Light Absorption in Guangxi Regional Background Site	WU Xing-qi, CAO Fang, HONG Yi-hang, <i>et al.</i>	(6518)
Characteristics of Light Absorption, Sources, and Seasonal Variation of Atmospheric Brown Carbon in Northern Nanjing	CHEN Xing-zhou, CUI Shi-jie, ZHANG Yun-jiang, <i>et al.</i>	(6529)
Health Benefit Assessment of Coal-to-electricity Policy on PM _{2.5} Pollution in Beijing-Tianjin-Hebei Region	ZHANG Ru-ting, CHEN Chuan-min, LIU Song-tao, <i>et al.</i>	(6541)
Source Apportionment of Ambient VOCs in Qingdao Based on Photochemical Loss Correction	KONG Cui-li, WU Yu-tong, GU Yao, <i>et al.</i>	(6551)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of VOCs in Urban Areas of Liaocheng in Summer	LI Wan-yong, HUANG Hao-yu, WANG Yan-zhen, <i>et al.</i>	(6564)
Source Analysis of Ozone and Its Precursors in Zibo Based on 3-D Air Quality Model	ZHANG Xin-xin, ZHAO Xiu-ying, HUANG Ling, <i>et al.</i>	(6576)
Spatio-temporal Characteristics and Influencing Factors of Ozone Suppression Events Under High Temperature in China	OU Lin-chong, CHEN Wei-hua, WU Yong-kang, <i>et al.</i>	(6586)
Review of UAV-based Atmospheric Fine Particulate Matter and Ozone Pollution Detection and Source Localization	QU Ya-wei, WANG Ti-jian, YUAN Cheng, <i>et al.</i>	(6598)
Health Impact Analysis of Fine Particulate Pollution from Vehicles in the Beijing-Tianjin-Hebei Region	HAO Yong-pei, SONG Xiao-wei, ZHU Xiao-dong, <i>et al.</i>	(6610)
Assessment of Emission Reduction Potential of CO ₂ Capture, Geological Utilization, and Storage in Cement Industry of China	WEI Ning, LIU Sheng-nan, WEI Feng, <i>et al.</i>	(6621)
Life Cycle Carbon Emission Accounting and Emission Reduction Potential Assessment of Steel Industry	SONG Xiao-cong, DU Shuai, DENG Chen-ning, <i>et al.</i>	(6630)
Evolution Characteristics and Driving Forces of Carbon Dioxide Emissions and Sinks in the Pearl River Delta Region, China	HU Jing-xin, SHA Qing-e, LIU Hui-lin, <i>et al.</i>	(6643)
Impact of Accelerated Electrification Under the Low Carbon Path in Dongguan City on the Coordinated Emission Reduction of CO ₂ and Pollutants	WU Le-min, CHEN Bing-yin, OU Lin-chong, <i>et al.</i>	(6653)
Relationship Between Urbanization and Carbon Emissions in the Chang-Zhu-Tan Region at the County Level	LIU Xian-zhao, LI Yang, <i>et al.</i>	(6664)
Characteristics and Influencing Factors of Greenhouse Fluxes from Urban Lawn	CHEN Li-han, LIU Shuo, LIN Yi, <i>et al.</i>	(6680)
Dual-Perspective Analysis of the Warming Effect of the Methane Emissions from Animal Husbandry in China	LIU Shu-le, YAN Wei, CAO Qing-xian, <i>et al.</i>	(6692)
Pollution Level and Risk Assessment of OPEs in Typical River Basins of China	ZHAO Jiang-lu, LU Hai-jian, LÜ Jia-pei, <i>et al.</i>	(6700)
Soil Heavy Metal Contamination, Sources, and Health Risk of Typical Drinking Water Sources in the Suspended Reach of the Lower Yellow River	PENG Chao-yue, REN Chong, SHEN Hao-xin, <i>et al.</i>	(6710)
Fraction Characteristic and Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments of the Yellow River Mainstream	WANG Yi-di, OUYANG Wei, LIU Lian-hua, <i>et al.</i>	(6720)
Influence of Land Use Structure and Spatial Pattern on Water Quality of Small and Medium-sized Rivers in Poyang Lake Basin	WEN Jia-wei, WANG Peng, HUANG Gao-xiang, <i>et al.</i>	(6728)
Water Environment Characteristics and Water Quality Assessment of Typical Lakes in Inner Mongolia	WANG Xin-yuan, PAN Bao-zhu, WANG Li-xin, <i>et al.</i>	(6744)
Relationship Between Precipitation, River Water, and Groundwater Conversion in the Upper Reaches of Xilin River During the Rainy Season	SUN Jin, WANG Yi-xuan, YANG Lu, <i>et al.</i>	(6754)
Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Groundwater in the Northwest Salt Lake Basin	YAN Yan, GAO Rui-zhong, LIU Ting-xi, <i>et al.</i>	(6767)
Groundwater Pollution Risk Assessment in Plain Area of Barkol-Yiwu Basin	LIU Yu, ZENG Yan-yan, ZHOU Jin-long, <i>et al.</i>	(6778)
Bisulfite Promoted Minute Fe ²⁺ -Activated Peroxydisulfate for Paracetamol Degradation	MO Xi-ting, NIE Shu-hua, YAN Cai-xia, <i>et al.</i>	(6790)
Degradation of Ciprofloxacin by Activating Peroxymonosulfate with Sludge Biochar	ZHENG Da-yang, ZOU Jia-li, XU Hao, <i>et al.</i>	(6801)
Adsorption of Iopamidol by NaHCO ₃ -activated Buckwheat Biochar	WEI Hong, ZHAO Jiang-juan, JING Li-ming, <i>et al.</i>	(6811)
Preparation of Bamboo-based N, P Co-doped Activated Carbon and Its Lanthanum Ion Adsorption Performance	WANG Gui-long, LIU Yan-yan, JIANG Rong-yuan, <i>et al.</i>	(6823)
Analysis of Vegetation Change and Influencing Factors in Southwest Alpine Canyon Area	LAI Jin-lin, QI Shi, CUI Ran-ran, <i>et al.</i>	(6833)
Effect of Biochar on Agricultural Soil Aggregates and Organic Carbon: A Meta-analysis	MENG Yan, SHEN Ya-wen, MENG Wei-wei, <i>et al.</i>	(6847)
Carbon Cycling Processes in Croplands and Their Quantification Methods	SUN Zhao-an, ZHU Biao, <i>et al.</i>	(6857)
Effects of Biochar Application on Soil Organic Carbon Component in <i>Eucalyptus</i> Plantations After Five Years in Northern Guangxi	MOU Zhi-yi, SHEN Yu-yi, CAO Yang, <i>et al.</i>	(6869)
Evolution Characteristics of Soil Active Organic Carbon and Carbon Pool Management Index Under Vegetation Restoration in Karst Area	CAI Hua, SHU Ying-ge, WANG Chang-min, <i>et al.</i>	(6880)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Typical Antibiotics in Environmental Media in China	CHEN Li-hong, CAO Ying, LI Qiang, <i>et al.</i>	(6894)
Spatial Prediction Modeling for Soil pH Based on Multiscale Geographical Weighted Regression (MGWR) and Its Influencing Factors	ZHAO Ming-song, CHEN Xuan-qiang, XU Shao-jie, <i>et al.</i>	(6909)
Characteristics and Source Analysis of Heavy Metal Pollution in Farmland Around a Coal-fired Power Plant	ZHANG Jun, LI Xu, LIU Lei-yu, <i>et al.</i>	(6921)
Characteristics of Soil Pollution and Source Analysis of Typical Pollutants in the Petrochemical Site	ZHANG Yu-rong, LUO Shuai, CHEN Yuan, <i>et al.</i>	(6933)
Characteristics of Antibiotic Resistance Genes Distribution in Different Types of Agricultural Land Soils in Highly Cultivated Hilly Areas	CHEN Rui, CHENG Jian-hua, TANG Xiang-yu, <i>et al.</i>	(6947)
Effects of Organic Fertilizer Combined with Biochar on Denitrifying Microorganisms and Enzyme Activities in Orchard Soil	DENG Zheng-xin, GAO Ming, XIONG Zi-yi, <i>et al.</i>	(6955)
Effects of Organic Fertilization on Bacterial Community and Maize Productivity in Dryland Red Soil	LIN Ting-ting, ZHENG Jie, ZHU Guo-fan, <i>et al.</i>	(6965)
Effects of Combined Pollution of Microplastics and Cadmium on Microbial Community Structure and Function of <i>Pennisetum hybridum</i> Rhizosphere Soil	DUAN Li-yang, ZHANG Yu, REN Xue-min, <i>et al.</i>	(6973)
Effects of Tomato Planting Years on Soil Physical and Chemical Properties and Microbial Communities	ZHAO Yang-yang, LIU Yin-shuang, SONG Yao, <i>et al.</i>	(6982)
Remediation of Three Oxidants on Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Coking Contaminated Soil and Its Response to Indigenous Microorganisms	LI Wei, WANG Hua-wei, MENG Xiang-yu, <i>et al.</i>	(6992)
Microbial Diversity and Population Structure of Different Salinized Soil Types in Hebei Province	LIU Yin-shuang, NIU Hong-jin, ZHAO Yang-yang, <i>et al.</i>	(7004)
Functional Genomics Analysis of Nitrogen and Phosphorus Transformation in Maize Rhizosphere Microorganisms	WANG Xiang-jun, JIANG Mei-tong, LI Sen, <i>et al.</i>	(7014)
Remediation of Soil Cadmium Contamination by <i>Solanum nigrum</i> L. Enhanced by the Combination of Exogenous Bacteria and Citric Acid	WANG Kai, WANG Li, WANG Yi-kun, <i>et al.</i>	(7024)
Effect of Combined Application of an <i>Enterobacter</i> and Sulfur Fertilizer on Cadmium and Arsenic Accumulation in Rice	ZHANG Pu-xin, YAO Jun-fan, LIU Yu-ling, <i>et al.</i>	(7036)